

Гуменний П. Одноканальний аналого-цифровий перетворювач у теоретико-числовому базисі Галуа як компонента процесорів вертикально-інформаційної технології// Гуменний П. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 3. — С.174-182. — (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).

УДК 681.325

П. Гуменний

Тернопільський національний економічний університет

ОДНОКАНАЛЬНИЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ У ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛОВОМУ БАЗИСІ ГАЛУА ЯК КОМПОНЕНТА ПРОЦЕСОРІВ ВЕРТИКАЛЬНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Резюме. Представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень різних видів теоретико-числових базисів (ТЧБ). Експериментально представлено кодові характеристики різних базисів, які породжують системи числення. Представлено переваги використання базису Галуа у порівнянні з іншими базисами для побудови одноканальних АЦП, наведено оцінку їх структурної складності та можливість реалізації спецпроцесорів на основі вертикально-інформаційної технології.

Ключові слова: аналого-цифровий перетворювач (АЦП), теоретико-числовий базис (ТЧБ), вертикально-інформаційна технологія (ВІТ).

P. Humenniy

SINGLE CHANNEL ANALOG-DIGITAL CONVERTER IN THE GALOIS THEORETICAL-DIGITAL BASIS, AS A COMPONENT OF VERTICAL-INFORMATION TECHNOLOGIES PROCESSORS

The summary. This paper presents the results of theoretical and experimental studies of various kinds of theoretical and numerical bases (TCHB). Represent the characteristics of different code bases, which generate notation system. Representation of Galois advantages, compared to other bases, to build the single ADC, given their assessment of structural complexity, and the possibility of special processors based on vertical information technology.

Key words: analog-digital converter (ADC), theoretical and digital basis (TDB), vertical information technology (VIT).

Постановка проблеми. При побудові сучасних спецпроцесорів, сигнальних процесорів та аналого-цифрових кодерів широко використовуються різні ТЧБ: унітарний, Хаара, Радемахера, Крестенсона, Уолша, Галуа. Перспективною для розвитку спеціалізованих процесорів є вертикально-інформаційна технологія на основі базису Галуа. Такі спецпроцесори вирішуватимуть багато завдань кореляційного аналізу, спектрального аналізу, розпізнавання інформації в реальному часі з вхідними аналоговими сигналами. Аналіз структури даних цифрових пристроїв показує, що до складу їх функціональних елементів входять АЦП. Тому при розробленні та вдосконаленні названого класу процесорів доцільним є дослідження системних характеристик АЦП з метою вибору раціональних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний вклад у розвиток теорії алгоритмів та побудови спецпроцесорів внесли українські вчені: А.І. Кондалев, Я.М. Николайчук, А.О. Мельник, М.В. Черкаський [1–4]. Значний внесок у розвиток теорії кодування даних на теоретичній основі шумоподібних сигналів та базису Галуа зробили А.І. Алексєєв, Я.М. Николайчук, Л.Е. Варакін, С.М. Іщераков, С.І. Мельничук, Л.Б. Петришин [2–7].

У роботах [1–3], по розробленні сучасних АЦП показано системні властивості складності, які можуть бути описані так:

$$S_{\text{АЦП}} = F(m, V, k, M, H_1, H_2, S),$$

де m – число каналів; V – швидкодія; k – розрядність; M – буферна пам'ять; H_1 – апаратна складність; H_2 – алгоритмічна складність; S – функціональні та інтерфейсні характеристики.

Питання розроблення теоретичних положень оцінювання апаратної та алгоритмічної складності цифрових процесорів детально розроблені та глибоко висвітлені в роботах [4], де запропоновано SH-модель алгоритму, що враховує апаратні засоби в явній формі

$$B = \langle D, Q, q_0, q_f, G, P, M \rangle,$$

де D – кінцева множина символів зовнішнього алфавіту; Q – кінцева множина станів SH-моделі; q_0 і q_f – початковий і кінцевий стани, $q_0, q_f \in Q$; G – конфігурація апаратних засобів моделі $G = (X, U)$; X – множина елементарних перетворювачів: $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; U – множина з'єднань $\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$; P – програма; M – пам'ять.

Окремим класом є АЦП на основі базису Галуа. Вперше такі структури запропонував Николайчук Я.М., які описано в роботах [5–7]. У даних перетворювачах використана базова структура АЦП паралельного типу (табл. 5.1, п.1), водночас зчитування інформації відбувається за k тактів відповідно до розрядності АЦП.

Постановка завдання. Основним завданням наукового дослідження є вирішення таких науково-технічних завдань:

1. Аналіз характеристик кодових матриць різних теоретико-числових базисів.
2. Дослідження ефективності кодових матриць, знаходження найефективнішого базису.
3. Розроблення ефективних методів побудови аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) як компонентів спецпроцесорів у базисі Галуа та реалізація їх на основі вертикально-інформаційної. Створити АЦП з мінімальним числом компараторів при формуванні k -розрядного коду поля Галуа.

Метою роботи є дослідження одноканальних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) в теоретико-числовому базисі Галуа як компоненту процесорів вертикально-інформаційної технології (ВІТ).

Теоретико-числові базиси та їх характеристики. Математичною основою теоретико-числових базисів є системи ортогональних функцій на деякому інтервалі зміни аргументу [10]. Найбільш використовується в техніці цифрового оброблення сигналів та побудови СП є ТЧБ Фур'є на основі ортогональної системи гармонічних функцій [10]. Прикладом застосування базису Фур'є є спектральний аналіз на основі рядів Фур'є

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos k\omega_1 t + b_k \cdot \sin k\omega_1 t), \quad (1)$$

$$\text{де } a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \cos k\omega_1 t dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot \sin k\omega_1 t dt. \quad (2)$$

Основним недоліком базису Фур'є є необхідність синтезу та цифрового оброблення гармонічних функцій, які, як правило, генеруються на основі рядів Тейлора та Маклорена [12]. При цьому суттєво знижується швидкодія процесорів цифрової обробки даних [13]. Класично дана задача була вирішена розробленням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) та створення відповідних конвеєрних СП. Останні тенденції у розвитку теорії методології та техніки процесорів, а також комп'ютерних систем зумовлені теоретичним та ідейним насиченням можливостей застосування базису Радемахера для побудови процесорних арифметико-логічних компонентів.

У зв'язку з цим існує проблема глобального дослідження характеристик, відмінних від ТЧБ Радемахера, та граничних можливостей їх застосування для реалізації компонентів як спеціалізованих, так і універсальних процесорів. Аналітичні вирази базисних функцій та характеристики названих ТЧБ наведено в табл. 1, які розраховано на основі кодових матриць ТЧБ, представлених на рис. 1 [5].

$$\begin{aligned}
 & M_{Uni} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{vmatrix}, M_{har} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{vmatrix}, M_{Cr} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\
 & \text{а)} \qquad \qquad \qquad \text{б)} \qquad \qquad \qquad \text{в)} \\
 & M_{Rad} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, M_{Gres} = \begin{vmatrix} P_1 & P_2 & \dots & P_x \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ 2 & 2 & \dots & 2 \\ 0 & 3 & \dots & 3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & a_2 & \dots & a_x \end{vmatrix}, M_G = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} \\
 & \text{г)} \qquad \qquad \qquad \text{д)} \qquad \qquad \qquad \text{е}
 \end{aligned}$$

Рисунок 1. Кодові матриці ТЧБ: а) Унітарний; б) Хаара; в) Крейга; г) Радемахера; д) Крестенсона; е) Галуа

Таблиця 1. Характеристики ТЧБ

Базис	Аналітичний вираз базисної функції	Об'єм кодової матриці, V	Число активних елементів, m
Унітарний	$Uni(n, \theta, i) = \text{sign}[\sin((2^{n-1} - i)\pi, \theta)]$	$V=N^2$	$m=N^2/2$
Хаара	$Har(n, \theta, i) = \text{sign}[\sin(i2^n \pi, \theta)]$	$V=N^2$	$m=N$
Крейга	$Crg(n, \theta) = \text{sign}[\sin((2^n - 1) \cdot \pi \cdot \theta)]$	$V = \frac{N^2}{2}$	$m=N^2/4$
Радемахера	$Rad(n, \theta) = \text{sign}[2^n \pi \cdot \theta]$	$V=N \cdot \log_2 N$	$m= (N \cdot \log_2 N) / 2$
Крестенсона	$N_i = \text{res} \sum_{i=1}^n (B_i \cdot b_i) \bmod P$	$V = \sum_{i=1}^m \log_2 (P_i)$	$m = \frac{N \left(\log_2 \prod_{i=1}^m P_i \right)}{2}$
Галуа	$N_j = f(C_{j-n-1}, \dots, C_{j-1}, C_j),$ $C_j = \sum_{j=0}^{n-1} C_{j-1} \cdot a \pmod{2},$	$V=N$	$m=N/2$

З метою оцінювання ефективності кодування даних у СП на основі різних ТЧБ доцільно провести аналіз кодових матриць, які породжують різні системи числення.

При цьому важливою характеристикою кожного базису є об'єм його кодової матриці M_j та число активних елементів m_j (рис. 1), що визначає характеристики надлишковості представлення інформації на основі аналітичної оцінки[1]

$$V_i = n_i \cdot N_i, \quad (3)$$

де n_j – розрядність числа; N_i – число незалежних кодових значень.

Основною характеристикою кодових систем Галуа є рекурсивна упаковка кодових елементів і повна кореляційна залежність елементів послідовності, що дозволяє перейти від паралельного формату представлення розрядів чисел, як у традиційних системах числення (паралельна інфотехнологія), до вертикального послідовного рекурсивного з бітоорієнтованим формуванням кожного з повідомлень (вертикальна інформаційна технологія) [8] за умови накопичення n попередніх кодових елементів, де $n = \log_2 N$, N – модуль перерахунку системи. У результаті рекурсивної залежності кодових елементів системи кодування Галуа володіють унікальною властивістю – на періоді $N = pn$, або $N = pn - 1$ усі елементи розташовуються таким чином, що довільний n -розрядний фрагмент (кодон) з рекурсивно породженої послідовності Галуа не повторюється на інтервалі періоду [5]. Отже, рекурсивні кодові послідовності Галуа представляються як рекурсивно вкладені n -розрядні p -ічні коди (кодони) на періоді $N=pn$. При кодуванні Галуа повідомлення ототожнюються з поліномами, а сама процедура кодування полягає в множенні вектора повідомлення на фіксований

поліном. Коди поля Галуа [9, 14] за загальною класифікацією відносяться до підкласу циклічних блокових кодів. У даних кодах послідовність елементарних повідомлень розбиваються на блоки символів ($B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$) фіксованої довжини K , кожному з яких ставиться у відповідність певна комбінація символів кодового слова ($b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$).

Найзручнішою формою представлення кодів Галуа є використання алгебраїчного виразу [9]

$$G(x) = a_{n-1} \times x^{n-1} + a_{n-2} \times x^{n-2} + \dots + a_1 \times x + a_0, \quad (4)$$

де $a_0 - a_{n-1}$ – числа, що дорівнюють «0» чи «1», які визначають відповідні значення розрядів кодових комбінацій.

Таким чином, дія над кодами Галуа зводиться до дії над відповідними математичними виразами. Коефіцієнти однакових степенів додаються за модулем 2.

Наприклад, у полі Галуа $G\left(\begin{smallmatrix} 4 \\ 2 \end{smallmatrix}\right)$ з ключем 1001 послідовність елементів $a_1, a_2, \dots,$

a_{15} визначається на основі рекурентного рівняння

$$G_{i+1} = G_i \oplus \overline{G_{i-n}}; n=4 \quad (5)$$

та має вигляд послідовності елементів 111101011001000, які кодують числа 0, 1, 2, ..., 14 по модулю $P = 15$. Кожен елемент цієї рекурентної послідовності можна описати у вигляді

$$a_1, a_2, a_3, a_4, a_1 \oplus a_4, a_1 \oplus a_2 \oplus a_4, a_1 \oplus a_2 \oplus a_3 \oplus a_4, a_1 \oplus a_2 \oplus a_3, \\ a_2 \oplus a_3 \oplus a_4, a_1 \oplus a_3, a_2 \oplus a_4, a_1 \oplus a_3 \oplus a_4, a_1 \oplus a_2, a_2 \oplus a_3, a_3 \oplus a_4 \quad (6)$$

Найефективніше переваги даного базису можна використати при кодуванні інтегральних значень, оскільки при інтегруванні кожне наступне значення збільшується на одиницю. Тому на відміну від базису Радемахера кожне дискретне значення інтеграла функції $x(t)$ замість n -розрядного двійкового коду фіксується одним бітом Галуа.

Оцінювання ефективності кодових базисів проводиться за виразом

$$K_{\text{ефект}} = \frac{N}{V}, \quad (7)$$

де $K_{\text{ефект}}$ – коефіцієнт ефективності кодових базисів;

N – кількість кодових комбінацій;

V – об'єм кодової матриці.

Дане дослідження виявило, що теоретико-числовий базис (ТЧБ) Галуа є найефективніший для кодування і представлення інформації, оскільки $K_{\text{ефект}} = 1$.

Дослідження системних характеристик АЦП Галуа як базового компонента ВІТ процесора. Аналіз архітектурної структури спецпроцесорів, сигнальних процесорів показує, що складовою їх функціональних елементів є одноканальні та багатоканальні АЦП. Тому при розробленні та вдосконаленні названого класу процесорів доцільним є дослідження системних характеристик АЦП Галуа.

У даних перетворювачах використана базова структура АЦП паралельного типу (Рис. 2).

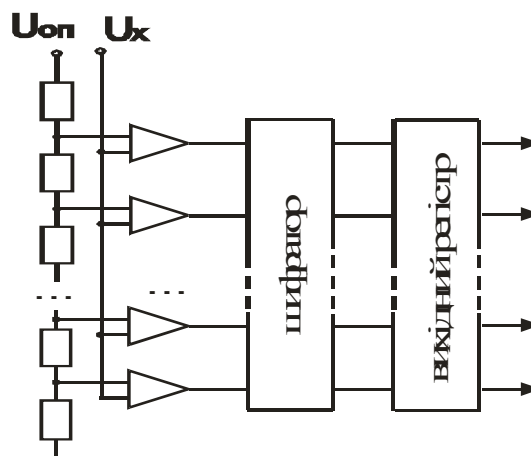


Рисунок 2. АЦП паралельного типу

У даних АЦП зчитування інформації відбувається за k тактів відповідно до розрядності. Слід відзначити такі відмінності й переваги даного класу АЦП, структури яких наведено в табл. 2.2:

- практична відсутність дешифратора паралельного коду в базисі Хаара у послідовний код базису Галуа, який реалізується на основі провідного логічного елемента “АБО” [18];
- можливість реалізації аналого-цифрового перетворення з буферизацією в запам'ятовуючому регістрі миттєвих значень вхідної напруги або зчитування цифрових даних у код Галуа за k тактів шляхом сканування вхідної напруги;
- унікальна можливість реалізації матриці компараторів з їх числом, удвічі меншим від числа рівнів квантування 2^k ;

- реалізація захисту вихідних кодів від помилок у процесі аналого-цифрового перетворення шляхом розширення числа тактів сканування $k+n$, де n – додаткові біти рекурентного коректуючого коду;
- високий рівень регулярності архітектури через відсутність пірамідального дешифратора, що суттєво спрощує його мікроелектронну реалізацію.

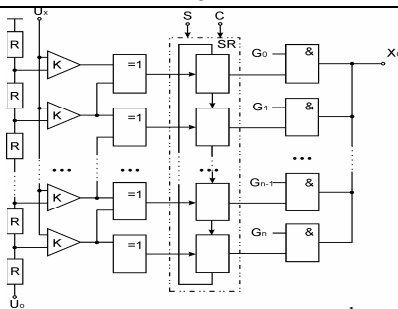
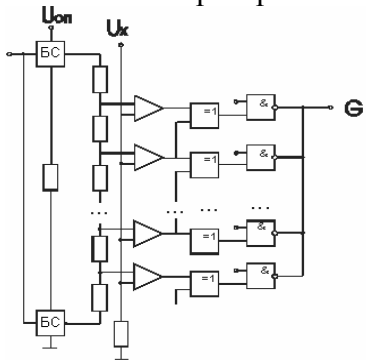
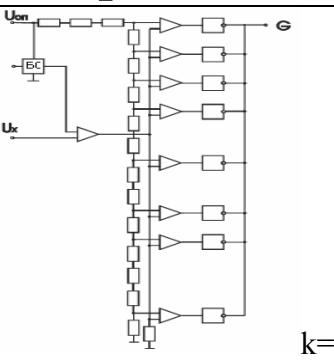
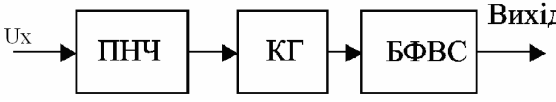
Аналіз характеристик одноканальних АЦП, структури яких наведено в табл. 2, показує, що максимальну швидкодію аналого-цифрового перетворення забезпечують АЦП з паралельною архітектурою. При цьому граничні характеристики швидкодії паралельних АЦП у структурному плані залежать від сумарного часу послідовного спрацювання його компонентів

$$T = t_k + t_{ш} + t_p, \quad (8)$$

де t_k , $t_{ш}$, t_p – відповідно затримки часу на переключення компаратора, пірамідального шифратора та D-тригера буферного регістра.

Наявність пірамідального шифратора, особливо багатоступеневого, значно впливає на зниження швидкодії такого класу АЦП. При цьому час перемикавання шифратора визначається числом послідовно з'єднаних логічних елементів, кількість яких залежить від розрядності k , тобто, $t_{ш} = \alpha k$, де $\alpha > 1$ – коефіцієнт, який враховує тип шифратора.

Таблиця 2. Структурні схеми АЦП у базисі Галуа

№	Тип АЦП	Структура	Параметри вихідних сигналів
1	2	3	4
1	Паралельний в базисі Галуа з буферним регістром	 <p>Число компараторів 2^k</p>	Послідовний код Галуа g_k g_{k-1} ... g_v g_{v-1} ... g_1
2	Скануючий в базисі Галуа	 <p>Число компараторів $2^k/2$</p>	Послідовний код Галуа g_k g_{k-1} ... g_v g_{v-1} ... g_1
3	Скануючий в базисі Галуа на імпульсних компараторах	 <p>$k=4$ Число компараторів $2^k/2$</p>	Послідовний код Галуа g_k g_{k-1} ... g_v g_{v-1} ... g_1
4	Інтегрально-імпульсний АЦП з імпульсним вихідним кодом у базисі Крейга-Галуа		Послідовний код в базисі Галуа ... g_k ... g_v g_{v-1} ... g_1 ...

Швидкодія АЦП Галуа з буферним регістром визначається оцінкою часового затримання сигналів в елементах

$$T = k(t_{TP} + t_{LE}) + t_K + t_{LE}, \quad (9)$$

де t_{TP}, t_{LE} – відповідно швидкодія тригера та логічного елемента.

Швидкодія АЦП Галуа скануючого типу з багастабільним елементом визначається часом затримання (табл. 3)

$$T = k(t_K + 2t_{LE} + t_{BC}), \quad (10)$$

де t_{BC} – швидкодія стабільного елемента.

Швидкодія АЦП Галуа скануючого типу на основі імпульсних компараторів характеризується часом затримання:

$$T = k(t_C + t_{BC} + t_K + t_{LE}), \quad (11)$$

де t_C – час затримання на суматорі.

Тому для кількісного оцінювання швидкодії АЦП приймемо, що в різних архітектурах перетворювачів використовуються однотипні елементи (компаратори, регістри, лічильники, ЦАП та інші). Дані параметри компонентів наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Час затримання на елементах АЦП

№	Компоненти	Позначення	Час спрацювання, нс
2	Багатостабільний елемент	БС	35
3	Вентильний елемент (74АС00)	ЛЕ	7
5	Генератор Галуа	ГГ	28
8	Компаратор (МАХ941)	К	80
18	Шифратор	Ш	3ЛЕ

На рис. 2.1 зображено графіки зміни швидкодії АЦП різних типів, побудованих на елементній базі (табл. 3) та аналітичних виразів (табл. 4) залежно від розрядності k .

Таблиця 4. Аналітичні вирази розрахунку часу затримання та параметри швидкодії АЦП

№	Тип АЦП	Аналітичний вираз розрахунку часу затримання, T_i	Швидкодія, кГц
1	Паралельний	$T = t_K + t_{Ш} + t_P$	9671,18
2	Інтегрально-імпульсний АЦП з імпульсним вихідним кодом у базисі Крейга-Галуа	$T = t_{ПНЧ} + t_{ЛГ} + t_{БФВС}$	821,4227
3	Паралельний у базисі Галуа з буферним регістром	$T = k(t_{ГР} + t_{ЛЕ}) + t_K + t_{ЛЕ}$	4830,918
4	Скануючий у базисі Галуа	$T = k(t_K + 2t_{ЛЕ} + t_{БС})$	968,9922
5	Скануючий у базисі Галуа на імпульсних компараторах	$T = k(t_C + t_{БС} + t_K + t_{ЛЕ})$	173,1302

З рис. 2.1 бачимо, що швидкодія найпоширеніших АЦП паралельного типу знижується при зростанні розрядності внаслідок зростання складності пірамідального дешифратора кодів базису Хаара в базис Радемахера.

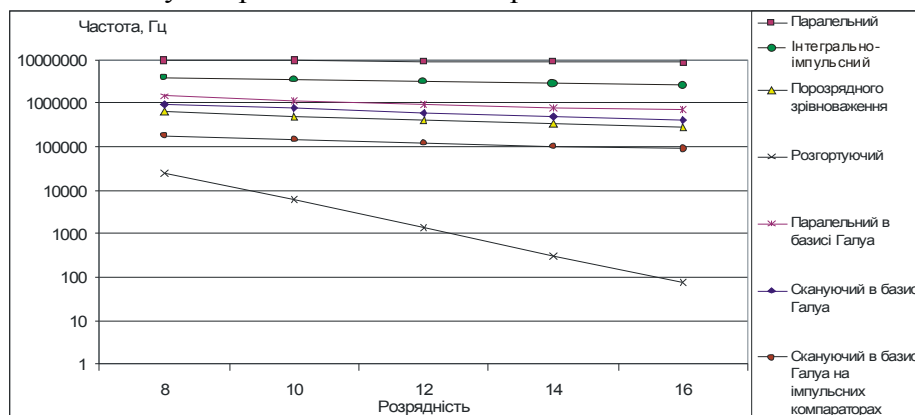


Рисунок 3. Швидкодія АЦП різних типів у базисах Радемахера та Галуа залежно від розрядності

У таблиці 2.4 наведено аналітичні вирази розрахунку часу затримання перетворення в АЦП. Інтегрально-імпульсний АЦП у базисі Галуа характеризується низькою структурною складністю та високою швидкістю у зв'язку з тим, що вони формують біт-орієнтований потік бітів Галуа, кожен з яких відповідає рекурентному коду інтегральних значень станів джерела інформації. Можлива також реалізація АЦП на основі ВІТ у базисі Галуа-Крестенсона.

Висновки. Проведено аналіз сучасних характеристик АЦП на основі ТЧБ Галуа, які широко використовуються у якості структурних компонентів процесорів на основі ВІТ. Досліджено функціональність та аналітика кодових матриць різних базисів, які використовуються в якості структурного елемента АЦП. Визначено, що швидкодія АЦП скануючого типу в базисі Галуа, на виході якого формується біт-орієнтований потік даних, суттєво перевищує швидкість АЦП послідовного наближення та порозрядного зрівноваження, що формують вихідні коди аналогічного типу. Найменшою швидкістю при зростанні розрядності характеризується АЦП розгортуючого типу, в якому цикл перетворення виконується за 2^k . Також є подальша перспектива у створенні АЦП, кількість компараторів у яких буде меншою $2^k/2$. Обґрунтовано перспективу використання базису Галуа у якості основи при розробленні мікропроцесорів та їх структурних елементів.

Література

1. Кондалев, А.И. Высокопроизводительные преобразователи формы информации [Текст] / А.И. Кондалев и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 280с.
2. Николайчук, Я.М. Теория джерел інформації [Текст] / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТНЕУ, 2008. – 536с.
3. Мельник, А.О. Апаратно-орієнтовані процесори швидких ортогональних перетворень [Текст] / А.О. Мельник, Ахмад Аль-Кхатіб // Вісник ДУ "Львівська політехніка": Комп'ютерні системи та мережі, 2000. – №385. – С. 127–135
4. Черкаський, М.В. Універсальна SH-модель [Текст] / Мурад Хусейн Халіл // Комп'ютерні системи та мережі: Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів, 2004. – №523. – С.150–154.
5. Николайчук, Я.М. Вертикальна інформаційна технологія в кодових системах Галуа [Текст] / Я.М. Николайчук, Л.Б. Петришин // Матеріали 2-ї Української конф. з автоматичного керування «Автоматика-95». – Львів, 1995. – С. 131.
6. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст] / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
7. Іщераков, С. М. Структурні властивості ключів багаторівневих М-послідовностей [Текст] / С.М. Іщераков, А.Я. Полянчик // Вісник Технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2005. – №4, Ч.1, Т2. – С. 65–68.
8. Мельничук, С.І. Малоенергетичні методи завадостійкого обміну даними в безпроводних комп'ютерних мережах автоматизованих систем [Текст] / С.І. Мельничук // BISTRO/ 96/052 Матеріали 2-ї міжнародної науково-практичної конференції "Управління енерговикористанням". – Львів, 1997. – С. 47–50.
9. Николайчук, Я.М. Дослідження системних характеристик двомірних кодів з особливими кореляційними властивостями [Текст] // Я.М. Николайчук, О.М. Заставний // Вісник технологічного університету Поділля, Хмельницький, 2004. – №2, Ч.1, Т2. – С. 107–110.
10. Валєєв, К.Г. Вища математика: навч. посібник [Текст] / К.Г. Валєєв, І.А. Джаладова. – Київ, 2002. – 560с.
11. Лабунець, В.Г. Теоретико-числовые преобразования над полями алгебраических чисел [Текст] / В.Г. Лабунець // В кн.: Применение ортогональных методов при обработке сигналов и анализе систем. – Свердловск: УПИ, 1981. – С. 44–54
12. Бухтаб, А.А. Теория чисел [Текст] / А.А. Бухтаб. – М.: Просвещение, 1966. – 384с.
13. Николайчук, Я.М. Теория джерел інформації [Текст] / Я.М. Николайчук. – Тернопіль: ТНЕУ, 2008. – 536с
14. Николайчук, Я.М. Дослідження архітектури комп'ютерів: принципи побудови процесорів на основі вертикально-інформаційної технології [Текст] / Я.М. Николайчук, П.В.Гуменний // Поступ в науку. Збірник наукових праць Буцацького інституту менеджменту і аудиту. – Буцач, 2009. – №5. – С. 69–73.

Отримано 16.05.2011